

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ФОРМЫ ИЗЛУЧАЮЩЕЙ ТРУБЫ НА ПОКАЗАТЕЛИ ЕЕ ТЕПЛОВОЙ РАБОТЫ

В последние годы большое внимание стали уделять качеству проката, особенно трубного. Для улучшения прочностных свойств труб из различных марок стали используется их термическая обработка, однако нагрев готового проката в атмосфере пламенных печей приводит к значительному окислению и обезуглероживанию поверхности труб, что существенно снижает их качество.

Для защиты поверхности готового проката при его термообработке применяют печи с защитной атмосферой и излучающими трубами. Печь представляет собой автоматизированный, компьютеризированный агрегат, оснащенный системой визуализации технологических параметров. Основным недостатком таких печей является их низкая производительность. Увеличение производительности возможно путем удлинения зоны нагрева и охлаждения, но этот путь не всегда возможно реализовать в условиях действующего производства, где просто нет места для увеличения длины печи.

Другой путь это увеличение температуры поверхности излучающих труб, что возможно при использовании труб из силицированного графита (SiSiC). По сравнению с трубами из жаропрочных сталей температура применения SiSiC примерно на 150–200 °C выше.

Важную роль в увеличении производительности в этом случае играет равномерность распределения температуры по поверхности излучающей трубы, которую можно существенно повысить путем распределения тепловыделения внутри трубы, что определяется газовой динамикой и способом сжигания газа горелками различного типа.

В последние годы для сжигания газа в радиационных трубах применяют рекуперативные скоростные горелки, способные организовать сжигание топлива в режиме объемного горения.

В настоящей работе исследованы расчетным путем распределения температур и коэффициентов теплоотдачи по поверхности радиационных труб различной конструкции. Исследования проведены с применением программного комплекса «SolidWorks».

Были рассмотрены три варианта существующих труб из керамики SiSiC (рис. 1): тупиковая излучающая труба с простыми керамическими вставками, которые показаны на рис. 1 (предложение фирмы EBNER), тупиковая излучающая труба с двумя простыми и двумя перфорированными жаровыми вставками и Ф-образная труба.

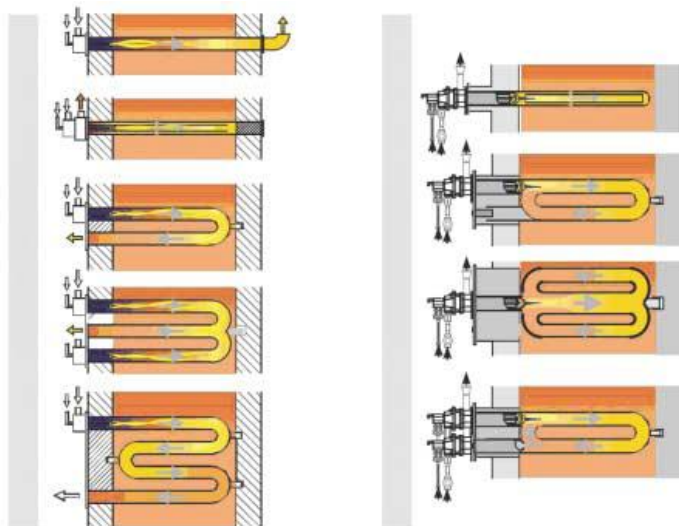


Рис. 1. Виды излучающих труб фирмы «WS»

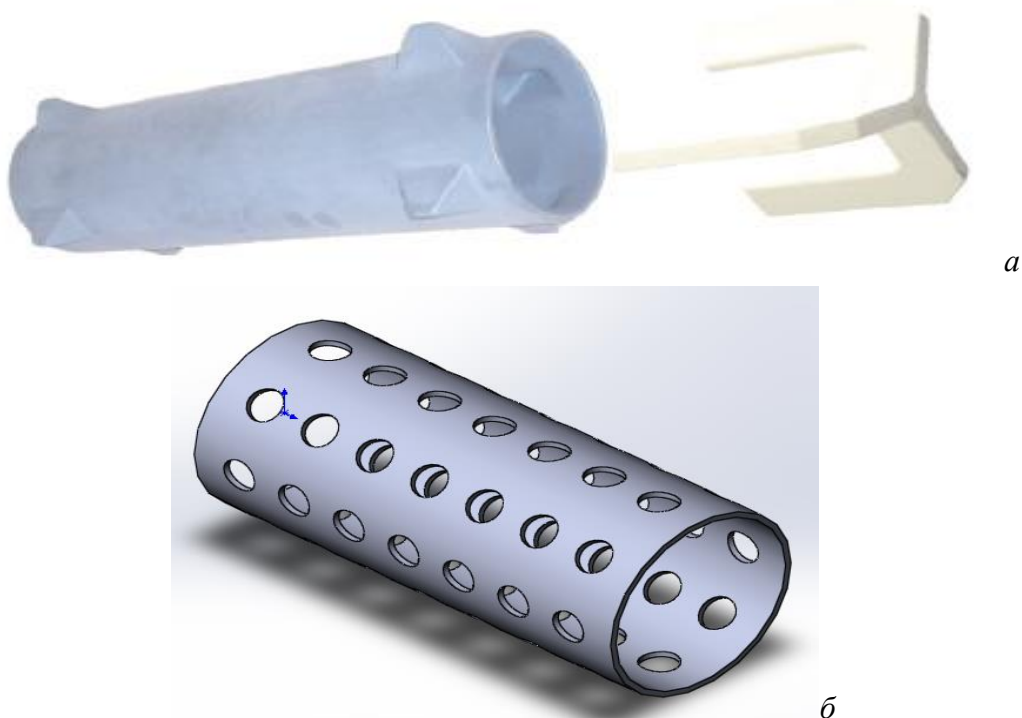


Рис. 2. Вставки в радиационные трубы: *а* – керамическая вставка фирмы WS;
б – упрощенный вариант перфорированной вставки

Задачей расчета газовой динамики и теплообмена в программе SolidWorks является определение равномерности распределения температуры и равномерности распределения коэффициентов теплоотдачи по поверхности труб. Результаты расчета программы SolidWorks представлены на рис. 3, 4, 5.

При расчете задали температуру газа, исходящего из сопла горелки 1500°C и на выходе из трубы – 650°C . Разность давлений составляет 10 кПа для тупиковой радиационной трубы и 50 кПа для Ф-образной радиационной трубы между входом и выходом. Расход газа $b = 0,0078$ кг/с.

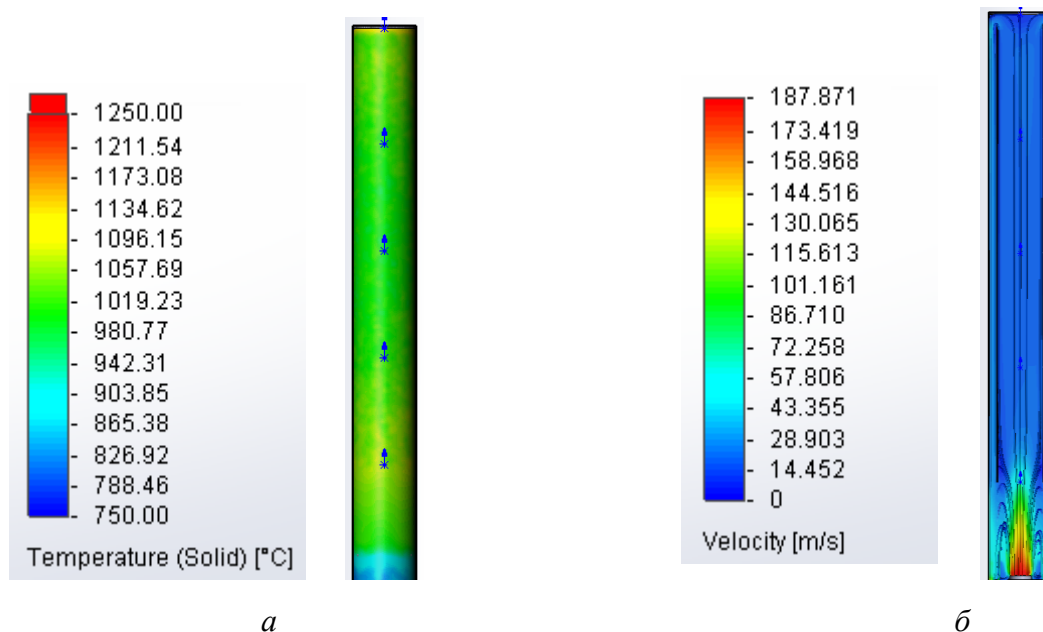


Рис. 3. Результаты расчетов радиационной трубы со сплошными жаровыми вставками: *а* – температурное поле стенки радиационной трубы; *б* – поле скоростей и движение газов

В первом варианте, в зоне между жаровыми вставками и стенкой радиационной трубы, наблюдается повышение температур, связанное с равномерной отдачей тепла от вставок газу. Только в зоне между второй и третьей вставкой на поверхности излучающей трубы замечено небольшое снижение температуры, как показано на рис. 3. В поле скоростей можно наглядно увидеть, как на протяжении всей длины трубы с изменением скорости меняются и температуры согласно правилам теплообмена. Максимальная скорость движения уходящих газов около 100 м/с на выходе из горелки, минимальная – около 40 м/с. Для второго варианта тупиковой излучающей трубы с двумя сплошными и двумя перфорированными вставками начальные и граничные условия те же, что в первом варианте. В зоне между жаровыми вставками и стенкой радиационной трубы, так же как и в первом варианте, наблюдается повышение температур, связанное с равномерной отдачей тепла от вставок газу. Только в зоне, где установлены перфорированные вставки, наблюдается резкое повышение температуры на поверхности излучающей трубы. В зоне между второй и третьей вставкой на поверхности излучающей трубы замечено небольшое снижение температуры, как показано на рис. 4. В результате температурное поле стенки излучающей трубы с двумя сплошными и двумя перфорированными вставками получилось не таким равномерным, как в предыдущем варианте. В поле скоростей можно наглядно увидеть, как на протяжении всей длины трубы с изменением скорости меняются и температуры согласно правилам теплообмена. Максимальная скорость движения уходящих газов около 100 м/с на выходе из горелки, минимальная около 40 м/с.

Для третьего варианта была выбрана Ф-образная излучающая труба с такими же граничными условиями, как в предыдущих вариантах. Температуру газа, исходящего из сопла горелки, 1500 0С и на выходе из трубы – 650 0С. Разность давлений составляет 50 кПа для Ф-образной радиационной трубы.

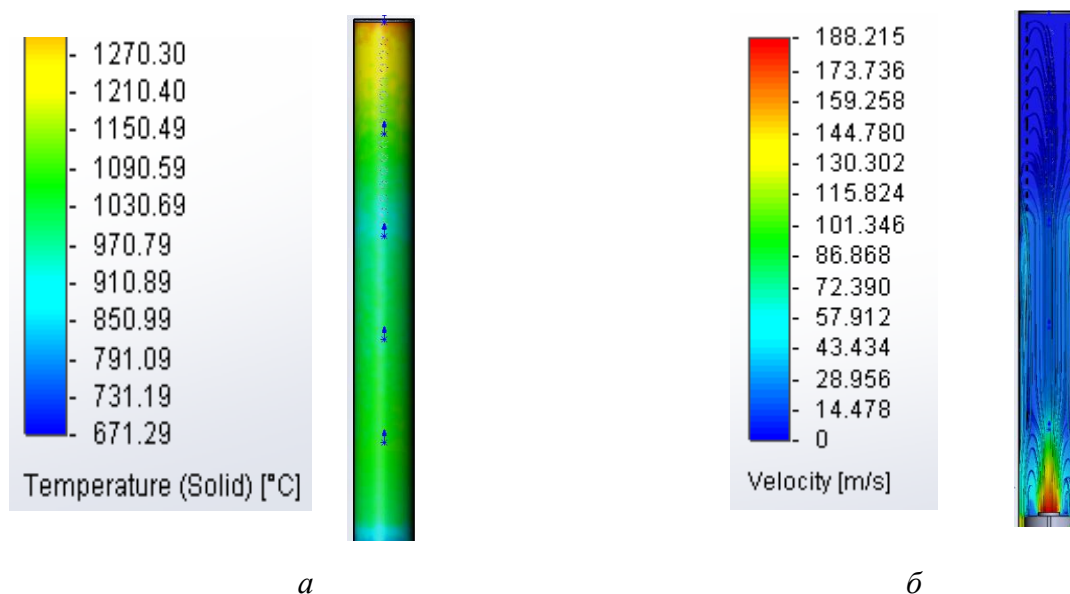


Рис. 4. Результаты расчетов радиационной трубы с двумя сплошными и двумя перфорированными жаровыми вставками: *а* – температурное поле стенки радиационной трубы; *б* – поле скоростей и движение газов

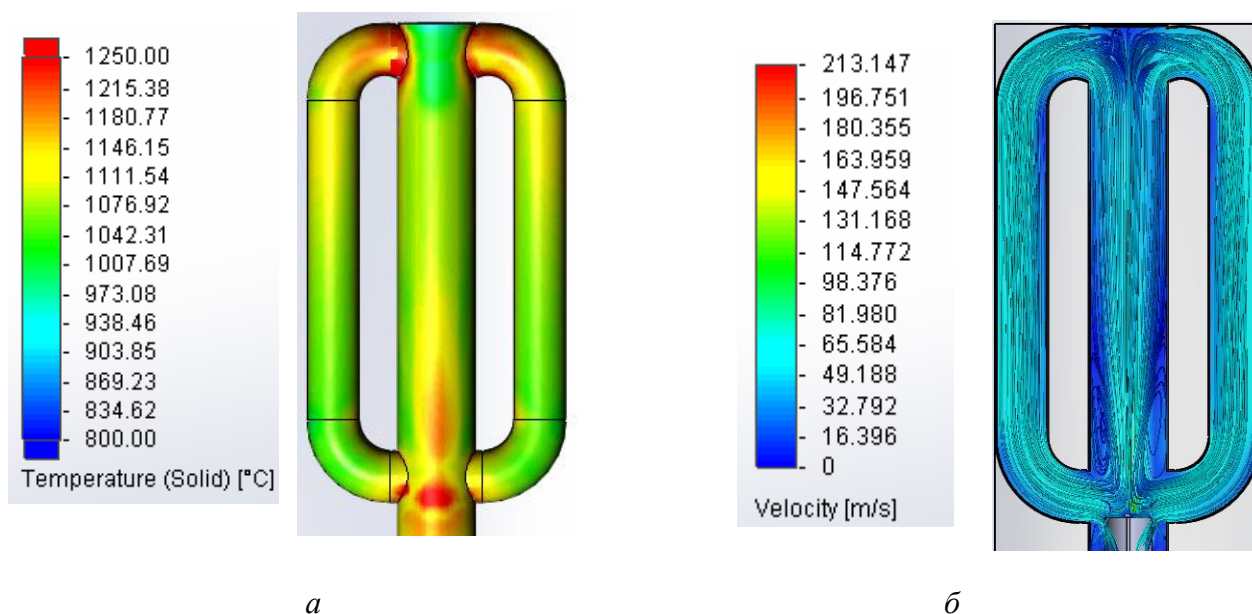


Рис. 5. Результаты расчетов Φ-образной радиационной трубы:
а – температурное поле стенки радиационной трубы; *б* – поле скоростей и движение газов

В начале центральной ветви наблюдается снижение температуры, что обусловлено разбавлением горячей струи уходящими газами. В конце центральной части Φ-образной радиационной трубы наблюдается небольшое снижение температур. Но уже сразу после поворотов температура в начале боковых ветвей данного типа излучающей трубы начинает расти. В конце этих ветвей на поворотах к горелке наблюдается незначительное снижение температу-

ры. В результате температурное поле стенки Φ -образной излучающей трубы визуально равномерно, как видно на рис. 5. В поле скоростей можно наглядно увидеть, как на протяжении всей длины трубы с изменением скорости меняются и температуры согласно правилам теплообмена. Максимальная скорость движения уходящих газов около 110 м/с на выходе из горелки, минимальная около 50 м/с.

На основании данных расчетов температур поверхности были определены коэффициенты неравномерности распределения температуры по поверхности труб разной конструкции K_T по формуле:

$$K_T = \{ \Sigma [(t_i - t_{cp}) F_i] / (F_{\Sigma} \cdot t_{cp}) \} 100 \%,$$

где t_i – средняя температура i -го участка трубы, °С;

t_{cp} – средняя температура всей поверхности трубы, °С;

F_i – площадь поверхности i -го участка, м²;

F_{Σ} – суммарная поверхность трубы, м²;

t_{cp} – средняя температура трубы, °С.

Аналогично был определен коэффициент неравномерности распределения коэффициентов теплоотдачи – K_{α} , по поверхности труб различной конструкции:

$$K_{\alpha} = \{ \Sigma [(\alpha_i - \alpha_{cp}) F_i] / (F_{\Sigma} \cdot \alpha_{cp}) \} 100 \%,$$

где α_i – средний коэффициент теплоотдачи i -го участка трубы;

α_{cp} – средний коэффициент всей поверхности трубы;

F_i – площадь поверхности i -го участка, м²;

Коэффициенты неравномерности распределения температур и коэффициентов теплоотдачи показывают, насколько неравномерно нагревается поверхность трубы в зависимости от ее конструкции. Именно это определяет среднее значение теплового потока, отдаваемого поверхностью трубы той или иной конструкции. Чем ниже коэффициент неравномерности, тем ближе средняя температура к максимально допустимой для данного материала трубы, а значит, тем больше тепловой поток, снимаемый с этой поверхности при прочих равных условиях.

Результаты расчета коэффициентов неравномерности

Наименование	Вариант 1	Вариант 2	Вариант 3
Коэффициенты неравномерности распределения температуры по поверхности, %	0,067	0,238	0,075
Коэффициент неравномерности распределения коэффициентов теплоотдачи, %	0,084	0,301	0,109

Из полученных результатов видно, что коэффициент неравномерности распределения температур в Варианте 1 ниже, чем в остальных случаях. Значит, средняя температура будет ближе к максимально допустимой для данного материала трубы. Применяя сплошные жаровые вставки в тупиковой излучающей трубе, можно больше снять тепла с поверхности при одинаковых условиях, чем в Варианте 2 и Варианте 3.